第 62 卷 第 3 期 北京大学学报(哲学社会科学版) Vol.62, No.3
2025 年 5 月 Journal of Peking University(Philosophy and Social Sciences) May 2025

论实验科学的起源

吴 国 盛

(清华大学 科学史系, 北京 100084)

摘　要: 希腊科学不是实验科学。自然与人工的严格分野,使实验既不可能,也无必要。炼金术打破了自然与人工之间的界限,成为实验科学的源头之一。中世纪技术革命提高了手工劳动和工匠的社会地位,把技术实践中的操作经验转化成为实验科学的方法论,成为实验科学的源头之二。中世纪后期的唯名论运动,扭转了亚里士多德为代表的古典科学的理想和目标,促进了实验科学的兴起。自然数学化运动本身产生了对实验的内在要求,成为实验科学的源头之四。印刷术的发明推动了知识的公开性和公共性,知识合法性标准的重建成为实验科学的源头之五。

关键词: 实验科学; 现代早期科学史; 文艺复兴

中图分类号: N 03　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1000-5919(2025)03-0065-12

爱因斯坦在 1953 年的一封信中说"西方科学的发展是以两个伟大的成就为基础,那就是: 希腊哲学家发明形式逻辑体系(在欧几里得几何学中),以及(在文艺复兴时期)发现通过系统的实验可能找出因果关系。"①这段话揭示了现代科学的两个基因: 一是数学,二是实验。爱因斯坦认为,现代科学的数学基因可上溯至古代希腊,实验基因则出现在文艺复兴时期。文艺复兴时期提供了哪些历史条件,使实验传统脱颖而出? 本文对此做些探讨。

一、为什么希腊科学不是实验科学

实验是一种主动的人类认知活动,它通过人工控制环境条件等独立变量,观察研究对象的相关反应,从而提供对因果关系的洞察,以检验所谓事实是否存在、既有理论假说是否正确。"实验"不等同于单纯的"观察",后者不主动干预研究对象,只是被动地记录自然环境下发生的事情。

实验不是希腊科学的内在特征,这与希腊科学的内在目标有关。希腊科学是希腊自由人性涵养和训练的教化方式,是希腊的主导人文。它追求纯粹知识,具有超功利和内在演绎两大特征。② 希腊奴隶制鄙视手工劳动,强化了这种纯粹知识的理想。柏拉图在《理想国》中强调几何学研究永恒不变的理念,反对实用技术玷污几何学的纯粹性。阿基米德尽管是一位机械天才,在罗马人入侵时研制了许多战场神器,为保卫母邦立下了汗马功劳,但是"他对于工程技术抱着藐视和不屑一顾的态度,充其量只不过可以实用或据以生利而已。他把全副精力用于纯理论的学问,根本不考虑世俗的需要"③。他不愿留下机械天才的名声,而强调自己纯粹数学家的身份。

希腊科学的这种只为追求真理的纯粹品质,在研究"自然"时,表现为注重"理解",反对人工干预。

收稿日期: 2025-01-15

作者简介: 吴国盛,清华大学科学史系教授。

基金项目: 国家社科基金重大项目"世界科学技术通史研究"(14ZDB017)

① 爱因斯坦:《爱因斯坦文集》第 1 卷,许良英等译,北京: 商务印书馆 1976 年版,第 574 页。

② 吴国盛:《科学作为希腊的人文》,《哲学分析》2015 年第 2 期,第 130—140 页。

③ 普鲁塔克:《希腊罗马名人传》第 2 卷,席代岳译,北京: 北京时代华文书局 2020 年版,第 291 页。

虽然老子《道德经》里已经五次出现过“自”“然”二字并列,但“自然”并不是一个古代汉语的词汇。现代汉语的“自然”一词是来自日本的对西文 nature 的译名,其外延和内涵均取自 nature。日本学者西周时懋在 1870 年发表的《百学连环》中第一个用“自然”来翻译西文 nature,1881 年井上哲次郎编撰的《哲学字汇》中明确将“自然”列为 nature 的标准译名。1902 年,梁启超在《新民说》中直接沿用日本译法,使用“自然科学”(natural science) 、“自然淘汰”(natural selection) 等术语。经过留日学生的广泛采用,“自然”一词在 20 世纪初年逐渐成为 nature 的标准汉译。①

英文 nature 一词源自拉丁文 natura,而拉丁文 natura 源自希腊文 physis。在现代英语中,nature 一词有两种用法:其一“自然界”,指自然物的集合;其二“本性”,指内在于事物、使事物如其所是的那种东西。这两种用法也贯穿在拉丁文和希腊文相应单词中,只不过,今天英语的 nature 更多用于“自然界”,更少用于“本性”,而在古代希腊文中,physis 更多用于“本性”,更少用于“自然界”。希腊人提炼了“本性”概念,标志着“自然”科学的真正诞生。

希腊人的 physis(自然/本性) 在亚里士多德的著作中定形,包含了三方面的含义。其一,事物有其“自身”、有其内在固有的逻辑,追究这种内在逻辑成为科学这种知识活动的独特使命。其二,通过与“人工物”的对照,“自然物”的概念被构造出来:自然物的运动根源在事物的内部,人工物的运动根源在事物的外部。其三,专门研究“自然物”之“本性”的学科被称为 physica(物理学) 。亚里士多德的物理学是追究“本性”的学问,因而也是“定性”的学问。②

在亚里士多德学说中,“自然”因为在其自身中拥有如其所是的根源,因而是无法改变、无法干预的,在“自然”面前,人类只有单纯的理解和无功利的求知,物理学因而也属于高档次的思辨科学(纯粹理论科学) 。人类对待自然最多是模仿,产生一些低档的“制作知识”。正是这样的“自然观”,使得希腊科学不可能产生人为干预自然的动机。自然无法干预,强行干预反而会影响对自然的认识,得不到真正的科学。“因此,希腊科学没有发展出实验方法,不是因为技术水平有限,而是因为希腊知识论背后的存在论(ontology) 所致。这种存在论预设了实验对于物理学不仅是不允许的,而且也是不可能的。”③

古代希腊有较高的机械制造技术水平。阿基米德(Archimedes, 公元前 287—前 212) 关于军事机械的设计和制造,亚历山大里亚的希罗(Hero of Alexandria, 公元 1 世纪或 2 世纪) 发明的汽转球等机械装置,都体现了很高的技术能力。1901 年在希腊安提克塞拉(antikythera) 岛附近一艘古罗马沉船中发现了一件长宽厚各为 34 厘米、18 厘米、9 厘米的机械装置,经过百余年来的研究发现,其中包含至少 37 个青铜齿轮,装置的功能是利用齿轮的不同传动比计算多种天文和历法周期。研究表明,这件如今称为“安提克塞拉机械”的装置的制造年份可追溯到公元前 100 年左右,是目前所知最古老的模拟天文计算机。这件精密的金属装置,再次证明了古代希腊人有很高的机械制造能力。实验科学之所以没有诞生在古代希腊,不是因为技术水平不够,而是因为观念所限。

古代希腊唯一一门试图改变“本性”的学问是机械学(mechanics) 。Mechanics 来自拉丁文 mechanicus,而 mechanicus 来源于希腊文 mechina。在希腊文中,mechina 有“机械、工具、装置”之意,如阿基米德制造的战争机器,也有“诡计”“计谋”“欺骗”等贬义,如特洛伊木马。这里反映了希腊人对违反本性的天然反感。机械学由于其强大的实用功能(如建筑、战争等) 在古希腊有所发展,但一直受到限制。机械学在现代早期得到极大的发展成为力学,并且成为现代物理学的基础学科,从反面说明了,希腊科学受制于其独特的自然观,主动拒绝或限制了对自然的干预活动。

---

① 20 世纪之前,曾经出现过“天”(利玛窦) 、“性”、“物理”(自然规律) 、“天演”(自然选择) 、“质力”(谭嗣同) 、“万物”(梁启超) 等译名。

② 参见吴国盛:《自然的发现》,《北京大学学报(哲学社会科学版) 》2008 年第 2 期,第 57—65 页。

③ 吴国盛:《什么是科学》,北京:商务印书馆 2023 年版,第 163 页。

在亚里士多德的知识(科学) 谱系中,最高级的知识是纯粹知识即“思辨科学”,思辨科学中又因其对象不同而分为三种。以不变且不可感者为对象是为形而上学(神学) ,以不变化但可感者为对象是为数学,以变化且可感者为对象是为物理学(自然学) 。自然学在思辨科学中位居末端,就是因为其对象“自然物”是运动变化,因此亚里士多德才说“不理解运动就不理解自然”。

何以“运动”就使携带这种特征的对象及其学术降级呢? 这根源于希腊思想中对“变化”现象的恐惧和回避。自从巴门尼德提出“存在者存在,不存在者不存在”的公理之后,“变化”就成了希腊思想中一个“问题”。为了维护“存在”公理,希腊思想家提出三种应对“变化”的方案。第一种方案,是巴门尼德、芝诺为代表的爱利亚学派采纳,柏拉图某种程度上也赞同的方案,即“否定运动”“拒绝变化”,将之打成错觉、幻觉。第二种方案,是多数前苏格拉底哲学家采取的还原论方案,即将运动变化还原到微观层面上若干“不变”之“始基”(arche) 的组合,虽然“始基”可能是“元素”,也可能是“原子”,组合的方法可能是“化合”,也可能是“机械组合”。

亚里士多德发明了第三种方案。他把“运动”理解成“潜能”向“现实”的转化。所谓“现实”,就是一个事物的纯“形式”,也就是柏拉图所谓的“相”。通常的事物由于掺杂有“质料”,所以并没有达到纯粹的“形式”,而处在“潜能”状态。但由于“形式”具有能动的引导作用,处在潜能状态下的事物,仍然有朝向纯粹形式的方向发展的“本性”冲动。这种冲动就是自然运动。在运动过程中,“本性”既是目的因,又是动力因,但首先是目的因。物理学(本性学) 的目标是发现“本性”,而“本性”基于对物之“物性”的“理解”。亚里士多德所谓“理解”,首先是“分类”和“范畴”,以及基于范畴的演绎和证明。因此,占据支配地位的亚里士多德物理学(自然之科学) ,是关于事物“本性”的经验直观,以及由这些“本性”编制的概念范畴的逻辑和证明性知识。“目的因”引导了古代希腊的“自然”之“科学”的研究路线。

二、源头之一: 炼金术的示范

实验科学的出现首先有赖于打破自然物与人工物的界限,炼金术对此做了示范。

炼金术诞生于希腊化埃及的亚历山大里亚,是希腊哲学与埃及古老金属冶炼术的某种奇特结合。它希望通过锻烧、熔合、发酵、过滤、融解、结晶、蒸发、升华等物理化学方式,实现贱金属(如铜、锡、铅、铁) 向黄金白银等贵金属的转变。从今天的眼光看,这个目标是不可能实现的,但炼金术活动作为一种人类文化现象延续了一千多年,为实验科学的出现提供了强大的文化背景。

希腊哲学中本来就有土水气火四元素相互转化的思想。柏拉图《蒂迈欧篇》给出了四元素相互转化的数学方案。亚里士多德在《论生灭》和《气象学》中给出了定性的转化方案,比如通过加“热”,水可以转化为气。亚里士多德的潜能-现实理论,还给出了事物追求“至善”的本性倾向。希腊化晚期的斯多亚学派认为自然物都是活的有机体,都有向完美状态“生长”的自然趋势。炼金术综合了这些思想,认为所有金属背后有一种单纯恒常的质料,通过火的“分离”,去除杂质,可以得到这种纯粹的质料,再把高贵的金属灵魂注入纯粹的质料之中,就可以完全贱金属向贵金属的嬗变。

从公元 3 世纪开始,炼金术在希腊化埃及兴盛起来,代表人物是佐西莫斯(Zosimos) 。他建立了炼金的四个阶段理论: 黑化、白化、染黄、染红。每一次颜色的变化,都代表了金属灵魂的一次升华。为了实现这些步骤,需要有熔炉、风箱、火钳、坩埚、烧杯、蒸馏瓶、长颈瓶等设备装置。公元 8 世纪,炼金术传到了阿拉伯世界。阿拉伯炼金家贾比尔(Jabir ibn-Hayyan) 发展了硫-汞理论,认为金属的差别在于所含硫的不同,硫越粗糙金属越低劣,硫越精细金属越高贵,炼金的过程就是不断提纯硫的过程。之后的炼金术家拉齐(al-Razi, 865—923) 在汞-硫理论基础上补充了盐,其著作《秘密的秘密》完善了炼金操作方案,如同实验手册。10 世纪,伊斯兰世界把三重伟大的赫尔墨斯(Hermes Trismegestus) 看成是炼金术的创始人,一些炼金术文本被说成是他的作品。12 世纪,炼金术由伊斯兰世界传到了拉丁西方。1200 年左右,一批拉丁文炼金术著作问世,托名盖伯(Geber) 之作,代表作是《完满大全》。

经院哲学家如托马斯·阿奎那对炼金术持谨慎的怀疑态度,赞同元素嬗变概念,但主张这种嬗变只能在自然界中发生,不大可能通过炼金术这样的人工方式实现。但是,罗吉尔·培根(Roger Bacon, 1214—1294) 是炼金术的坚定支持者。他认为人的技艺并不弱于自然,而是相反,人工物可以达到甚至优于自然物。

并非偶然,正是罗吉尔·培根在《大著作》(Opus Majus) 中首次提出了"实验科学"(scientia experimentalis) 这一概念,改变了之前"实验"(experimentum) 与"经验"(experintia) 二词不加区分的状态,突出了"实验"的有目的、有计划的主动含义。他认为,经验是许多人共有的,但实验是少数人通过理性设计完成的。

文艺复兴时期,三重伟大的赫尔墨斯的著作《赫尔墨斯文集》(Hermetica) 大为流行。这位从伊斯兰世界流传过来的炼金始祖,被拉丁学者认可为与基督教先知摩西同时代的古埃及圣贤,并且代表了神启的另一个秘密来源。有一种说法,他因为被视为集哲学家(智慧) 、祭司(神性) 与国王(权力) 三重身份于一身,而被称为"三重伟大"。赫尔墨斯著作和学说的追随者们,推崇炼金术和自然魔法(natural magic) ,认为通过神秘的方式,人类拥有改变自然的潜在力量。

自然魔法是文艺复兴时期一股重要的思潮,也是实验科学的重要来源。它相信可以通过研究自然的隐秘力量(如天体影响、植物药性、矿物特性等) 来实现对自然的控制和解释。除了赫尔墨斯主义的加持外,新柏拉图主义是自然魔法的另一个来源。希腊化晚期诞生的新柏拉图主义者普罗拉诺(Plotinus, 205—270) 提出"流溢说"(Emanation) ,认为万物都源自神圣本原的流溢,自然中的神秘力量是神圣力量的体现。文艺复兴时期,在赫尔墨斯主义和新复兴的新柏拉图主义共同影响下,自然魔法风靡一时。科隆出生的阿格里帕(Heinrich Cornelius Agrippa, 1486—1535) 于 1531 年出版《论神秘哲学》(De Occulta Philosophia) ,将自然魔法分成天体魔法、元素魔法和仪式魔法三类,建立了系统的自然魔法理论,极大地影响了后世的自然魔法师投身于对自然的实验研究。

约翰·迪(John Dee, 1527—1608) 是英国著名的科学活动家,伊丽莎白女王的宫廷天文学家和数学家,因而有广泛的社会影响力。他翻译《几何原本》、设计航海仪器、推动墨卡托投影法的应用、研究透视法,但也是声名显赫的自然魔法师、赫尔墨斯主义者。

意大利波尔塔(Giambattista della Porta,1535—1615) 是著名的自然魔法师,1558 年出版的《自然魔法》(Magia Naturalis) 探讨了光学与视觉(暗箱实验) 、磁石现象(构想永动机) 、植物与动物的神秘属性(曼德拉草的麻醉任务) 、炼金术(金属转化与药物制备) 、密码学与隐形墨水等,强调用自然原因解释神秘现象,确立了自然魔法的实验科学维度。他于 1560 年左右在那不勒斯创办的自然秘密学社(Academia Secretorum Naturae) 是现代早期第一个私人科学社团,成为后来皇家学会的先驱。自然秘密学社因为被指从事巫术,被教皇警告,不得不在 1578 年左右解散。1610 年,波尔塔加入了林琴学社(Accademia dei Lincei) (伽利略于 1611 年加入) ,成为意大利实验科学的重要代表人物之一。

在赫尔墨斯主义的炼金术士中,帕拉塞尔苏斯(Paracelsus, 1493—1541) 尤其具有典型意义。他在医学中反对盲从盖伦、阿维森纳这样的权威,强调观察和实验的意义,引入矿物药物和化学药物(如汞、硫、砷) 。他改变了传统炼金术由贱金属向贵金属嬗变的制金目标,视之为制造药物和理解自然的工具。他认为上帝是一位炼金家,炼金术用火清除杂质,是救赎堕落世界的重要方式。帕拉塞尔苏斯及其追随者,是将炼金术转变为实验化学的重要推手。

帕拉塞尔苏斯的重要继承者赫尔蒙特(Jan Baptista van Helmont,1580—1644) 现在公认是现代化学和实验科学的先驱,但他是当时著名的炼金术士。他认识到气体是一种独立的物质形态,创造了"气体"(gas) 概念; 他通过柳树实验,推测树木的生长主要来自水而非土壤,开创了定量研究和变量控制的实验科学方法论。

公认的实验科学大家、现代化学的重要创始人罗伯特·波义耳(Robert Boyle, 1627—1691) 也是一

位炼金术士。波义耳以其空气泵实验和定量研究(波义耳定律) 著称,但他仍然相信炼金术的核心目标即物质嬗变是可能的。他与当时英国著名的炼金术士斯塔基(George Starkey) 频繁通信,交流炼金术的经验。

总而言之,炼金术从两个方面为实验科学准备了条件: 其一,确立了人工可以而且应该干预自然过程的概念,其二,为实验化学积累了丰富的仪器设备和操作经验。在现代早期,化学是实验科学最重要的门类。

三、源头之二: 中世纪技术革命的加持

技术史家林恩·怀特认为,大量奴隶作为廉价劳动力的存在使统治者丧失技术革新的动力。① 除了城市建筑和交通运输方面之外,希腊和罗马古典时代的技术水平整体不高。西罗马帝国于公元 476 年灭亡之后,奴隶制随之解体,约束技术创新的制度因素消失,技术与手工业在欧洲文化中的地位逐渐上升。

公元 500—1000 年,欧洲发生了农业革命。重犁的使用和三田轮作制,增加了农业产出。马轭等挽具的发明,使马代替牛成为主要的畜力,耕田效率极大提高。农业革命使欧洲人口从公元 600 年的 2600 万,提高到 1000 年的 3600 万,再提高到 1300 年的 7900 万。

农业革命之外欧洲中世纪还发生了动力革命,即水磨和风磨的大量使用。欧洲水力充沛,9 世纪开始水磨在欧洲迅速普及。1086 年的《末日审判书》记载英格兰有六千座水磨。12 世纪法国的索恩河上有数百座水磨。水力除了用于磨坊,也用于锯木、锻打、浆洗、鼓风,推动了金属冶炼和造纸印染业的发展。在低地国家和北欧,尤其是水力不足地区和沿海地区,12 世纪晚期出现大量风车,可能是十字军东征从近东地区带回了风车技术。荷兰利用风车驱动水泵排水,将沼泽的水排入运河,以开垦农田。到 15 世纪末,西欧有数千座风车,主要分布在英格兰东部和荷兰。水力和风力的大量使用,造成了一种新型的动力文明。怀特评论说 "中世纪后期主要的光荣,不是大教堂,不是史诗,也不是经院哲学,而是有史以来一个复杂文明的首次建立,这一文明并非建立在辛勤劳作的奴隶或苦力的背脊上,而主要建立在非人力之上。"②

风车和水车的使用和优化,推动了机械技术的发展。13 世纪以擒纵系统的发明为基础的机械钟的发明和推广,把欧洲机械技术推向了一个高峰。柯林武德总结说 "16 世纪时工业革命正在上路。印刷机与风车,杠杆,水泵与滑轮,钟表与独轮车,以及在矿工和工程师中使用的大量机械,构成了日常生活的特征。每一个人都懂得机械的本质,制造和使用这类东西的经验已经开始成为欧洲人一般意识中的一部分。导向如下命题就很容易了: 上帝之于自然,就如同钟表制造者或水车设计者之于钟表或水车。"③

除了农业革命和机械技术革命外,在军事技术、采矿和冶炼技术、玻璃制造技术、纺织技术、印刷术、航海与造船技术等方面,中世纪后期都发生了或大或小的革命性变化,为现代早期的实验科学准备了技术条件。

持续的技术革命推动了经济发展,提升了手工业者的地位。9 世纪,爱尔兰哲学家约翰·爱留根纳(John Scotus Eriugena) 在七门 "自由技艺"(liberal arts,算术、几何、音乐、天文、逻辑、方法、修辞) 之外提出 "机械技艺"(mechanical arts) 的概念,包括纺织(*estiaria*) 、农业(*agricultura*) 、建筑(*Architectura*) 、武备(*Armatura*) 、贸易(*Mercatura*) 、烹饪(*coquinaria*) 、冶金(*metallaria*) ,史称 "机械七艺",反映了实用手工

---

① Lynn White, *Medieval Technology and Social Change*, Oxford University Press, 1962.

② Lynn White, "Technology and invention in the Middle Ages", *Speculum*, 15(2) , p.156.

③ 柯林武德《自然的观念》,吴国盛译,北京: 商务印书馆 2017 年版,第 12 页。

技艺地位的提高。12 世纪,圣维克多的休(Hugh of St. Victor,约 1096—1141) 将其中的商业、农业和烹饪分别替换为航海(*Navigatio*) 、医学(*Medicina*) 和戏剧(*Theatrica*) ,并且将机械七艺与自由七艺一起纳入基督教的知识体系之中。虽然自由七艺依照传统仍被认为是高贵的学问,但借助于强调其"模仿上帝创造"的神圣性,机械七艺的地位大大提高。

文艺复兴时期,以达芬奇为代表的新一代造型艺术家,将机械七艺与自由七艺相结合,进一步提高手工劳动和行业工匠的地位。达芬奇(Leonard da Vinci, 1452—1519) 因为是私生子,未受到正规教育,1466 年左右进入佛罗伦萨有名的画匠、首饰匠韦罗基奥(Andrea del Verrocchio,1435-1488) 的工作室当学徒,1472 年成为画师,并且加入佛罗伦萨画家行会(*Compagnia di San Luca*) 。他的职业属于传统意义上机械七艺的行列,定位是"军事装备"师,但他杰出的天才不仅体现在卓越的绘画技艺上,而且体现在超出画匠的行业限制、主动吸取并融合自由七艺这种伟大的历史性选择。他自学欧几里得几何学和当时新兴的透视法,用于绘画和工程设计中; 自学音乐和声学和天文学,设计乐器和音乐机械装置、绘制星图,成为兼具工匠动手操作能力和学者理论思维的现代艺术家。1563 年,佛罗伦萨的画家和艺术理论家瓦萨里(Giorgio Vasari) 在美第奇家族支持下,创办了现代第一所美术学院佛罗伦萨迪塞诺学院(Accelemia delle Arti del Disegno) ,从此绘画等造型艺术由"手工艺"提升为与音乐、数学并列的"自由之艺",画匠画师从匠人阶层的"手工艺人"提升为知识阶层的"造型艺术家"。

阿格里科拉(Georgius Agricola,1494—1555) 是另一位体现了学者与工匠相结合的代表人物。1556 年出版的《矿冶全书》(De re metallica) ,使他获得现代矿物学和采矿学之父的美誉。他的出生地德国萨克森州的格劳豪(Glauchau) 是欧洲繁荣的银矿、铜矿和锡矿中心之一。萨克森矿区也是神圣罗马帝国的财富支柱。他本来学习古典语言和医学,深受人文主义影响,但也受帕拉塞尔苏斯关于矿物制备药物的影响。当他 1527 年定居开姆尼兹(Chemnitz) 并担任城镇医生之后,对当地的矿业发生兴趣,并深度参与矿业活动。他频繁访问矿井,向矿工和冶炼技师学习采矿和冶炼的技术细节,同时思考矿物分类和矿物成因等理论问题。12 卷拉丁文《矿冶全书》对当时的采矿、矿石处理、冶炼、金属提纯等技艺,以及水泵、通风设备等矿井机械工具等做了系统描述,使从前只是矿工们内部口传心授的封闭技艺,成为可以广泛传播发展的学术知识。阿格里科拉的"观察-记录-系统化"的方法,影响了弗兰西斯·培根的科学方法论。

中世纪后期技术革命不仅提高了手工劳动和工匠的社会地位,而且把技术实践中的操作经验转化成为实验科学的方法论,其中最为突出的是,将工匠的"试错-改进"(Trial and Error) 法转化为控制变量的实验科学方法论。比如,帕拉塞尔苏斯主张使用矿物药(如汞) ,并通过剂量控制来验证毒性。工匠在试错过程中,可能同时改变多个变量,是否能够得出有效结论带有运气的成分,而科学实验在理论的指导下,固定其他变量,只研究单一因素的影响。

技术革命还为实验科学准备了大量的工具和设备。镜片磨制技术导致了望远镜和显微镜的发明,扩展了认识的边界; 威尼斯的玻璃工艺,使实验室器皿标准化; 修道院发明的以擒纵器为基础的计时器,导致了精密计时器的持续改进; 矿坑排水的技术,导致真空泵的发明; 外科手术刀具的改进,推动了生理解剖实践; 印刷术提高了自然知识的传播速度和广度。

四、源头之三: 基督教唯名论神学的背书

实验科学的兴起与基督教的强大背景密不可分。除了基督教教义里对手工劳动的推崇有助于发展手工业、提高基督教世界的技术能力外,中世纪后期的唯名论运动思潮,扭转了亚里士多德为代表的古典科学的理想和目标,促进了实验科学的兴起。

希腊古典科学是"求真的科学",现代科学是"求力的科学",在从求真的科学转向求力的科学的过

程中,基督教扮演重要的角色。① 以托马斯·阿奎那(Thomas Aquina, 1225—1274) 为代表的经院哲学家将亚里士多德思想及其所代表的理性思维引入基督教世界,完成了两希文明的整合。亚里士多德主义从此在大学里站稳了脚跟,成为中世纪后期基督教思想界占统治地位的科学和哲学理论。

14 世纪兴起的基督教唯名论思想运动,从质疑亚里士多德的共相理论出发,捍卫和高扬上帝的绝对意志。所谓共相(universals) 即多个事物共有的普遍概念如"人""红""正义"等,与之相对的是殊相(particulars) 如"苏格拉底""这朵红花"等。按照共相理论,共相是独立存在的实体,是诸多事物的普遍本质,具体事物的运动和变化是这些共相的实现。共相理论也称实在论(或"唯实论") 。经院哲学家普遍认为,共相反映了上帝的理性设计,存在于上帝的理性之中,并通过创世体现在具体的事物之中。共相的存在证明了宇宙的秩序和目的,体现了上帝的全知全能。

以奥康的威廉(William of Ockham, 约 1287—1347) 为代表的唯名论思想家认为,所谓共相只是名称或概念,并不存在独立的本体论地位,也与上帝的理性无关,只是人类语言的虚构产物。认为普遍概念只是"名称"不是"实体",这是唯名论(nominalism) 一词的由来。

唯名论与唯实论的分歧表面看来只是言辞和概念之争,其实背后潜藏着神学上的根本分歧。唯实论更倾向于以希腊理性思维的方式来看待上帝及其造物,而唯名论则更强调上帝全能以及绝对意志。在唯名论看来,共相的存在限制了上帝的绝对自由和绝对意志; 相反,在全能和绝对自由的上帝面前,根本不存在任何理性规则的限制,任何事物都作为具体的个别事物直接受制于上帝的操控,而不是受制于共相的先天必然性。比如,在希腊科学看来,太阳每天东升西落是一种先天必然的现象,因为太阳是"天体",而"天体必然镶嵌在天球上随天球匀速转动"。然而,在唯名论者看来,"太阳"只是一个名称,不包含任何理性的必然性。我们一向观察到的太阳每天东升西落现象,只是一种偶然的经验,至于明天太阳是否还会东升西落,有待明天的经验来验证,并无先天的必然性。只有经验研究,才能获得关于事物的知识,而且这种知识"永远也不可能超出假说,因为神是绝对自由的,甚至可以不遵从自己过去的决定。他可以推翻任何业已确立的事物,暂时中断任何原因链条,如果愿意,甚至可以从头重新创造世界。因此,除了神的意志,没有绝对的必然性"②。

14 世纪出现的唯名论是基督教世界一场深刻的思想革命,直接影响了之后的人文主义运动和宗教改革运动。唯名论过分强调上帝的绝对意志从而反复无常、不可理喻、令人敬畏和恐惧,这使得得救也成为无法预料、极端不确定的事情,使基督教欧洲面临深刻的思想危机。人文主义通过高扬具有自由意志的人来解除唯名论制造的困境。人文主义的"人"不是古代共相意义上的"通人",而是唯名论意义上的"个人"; 但人文主义者所说的人的自由意志,并不是唯名论意义上的"被创造"的意志,而是"主动创造""自我创造"的意志。正是这种能够主动"创造"的个体的人,代替了唯名论的无法捉摸的上帝来重新创造和维持世界的秩序。人文主义的"主动创造"的人,是实验科学之主体性、主动性的来源。

唯名论对上帝绝对意志的高扬,瓦解了世界的理性构造,也严重挑战了亚里士多德的目的论物理学。正如前面所说,亚里士多德的物理学是关于事物"本性"的理论构造,而"本性"(自然) 是事物的"形式",也是自然物的"目的"。形式引导事物运动变化的方向和目标。唯名论摧毁事物的"本性"之后,就摧毁了目的论物理学的整个基础。

唯名论拒绝事物的共相之后,却推动了以某种方式重视具体事物及其变化本身。如果世界是真的存在,那只是因为它是某种意义上作为上帝的存在,而上帝必定以某种方式存在于事物之中。以何种方式? 以事物"运动变化"的方式。因此,研究事物的运动变化就是在理解上帝的意志(即世界的法则) 。于是,以唯名论为基础的新物理学,在放弃对"事物应当如何"的目的论解释之后,转而注重对"事物实

① 吴国盛:《从求真的科学到求力的科学》,《中国高校社会科学》2016 年第 1 期,第 41—50 页。

② 吉莱斯皮:《现代性的神学起源》,张卜天译,长沙: 湖南科技出版社 2012 年出版,第 33 页。

际如何”的经验描述,以及在此经验描述基础上寻求现象之间暂时而有限的因果关联。

中世纪晚期,正是一些唯名论者成为反对亚里士多德物理学的先锋以及现代实验科学的先驱。巴黎的唯名论者让·布里丹(Jean Buridan, 1300—1358)反对亚里士多德关于抛物体运动的“介质推动”理论,提出冲力理论(Impetus Theory),成为伽利略运动学的先驱。另一位巴黎唯名论者尼古拉·奥雷姆(Nicole Oresme, 1325—1382)提出地球自转而恒星天球静止,制订了质的量化和运动量化的数学方案,成为哥白尼日心说的先驱。奥雷姆的学生、荷兰经院哲学家英根的马西留斯(Marsilius of Inghen, 约1340—1396)主张知识来源于感觉经验,并在他的《物理八书问题集》(Questions on the Eight Books of the Physics)中引用古代的漏壶实验来证明“自然界厌恶真空”,成为波义耳气体研究的先驱。

五、源头之四:自然的数学化推动精密测量

科学史家柯瓦雷在提到现代科学的数学传统与实验传统时强调了两者之间的密切联系:“实验与理论不仅不是相互对立的,而且还是相互联系、相互决定的,正是由于理论的精确和完善,才使得实验更加精确。……实验是一个有目的的过程,其目的是由理论决定的。”①这提示我们,自然数学化运动本身也产生了对实验的内在诉求。

自然的数学化运动可以上溯到希腊的毕达哥拉斯学派以及柏拉图学派,他们都强调了数学对于认识实在的根本意义,但亚里士多德清晰地区分了数学学科与物理学科:数学研究不变但可感的对象,物理学研究变化且可感的对象。自然物(内部拥有自身运动变化根源的事物)作为物理学的研究对象,并不是数学的对象,把数学用于自然探索那是范畴混乱、概念误用。亚里士多德以月亮所在天球划界分为月上天和月下天,月上天由单一元素以太构成,不生不灭,做永恒的均速圆周运动;月下天由四元素构成,有生有灭,做直线运动。月上天因为不生不灭,因此是数学(天文学)合法的领域,月下天是物理学的领域,不能使用数学。现代人认为是天体的彗星、银河等,均被希腊人看成是月下天的大气现象(气象学 meteorology 以流星 meteo 为词根即是证据)。自然的数学化运动要把数学的原则用于月下天的地界,首先必须打破亚里士多德天地二分理论的基本框架。

现代自然数学化运动的主流始自哥白尼的天文学革命。哥白尼的日心理论将“地”球置于行星“天”体的位置,这就创造了打破天-地二分的基本逻辑条件。第谷发现了彗星并非月下物体,它在天界的直线飞行必定会打破行星天球。第谷的地心-日心混合宇宙模型,也使行星天球无法行使原有的物理宇宙学功能。开普勒发现的行星椭圆轨道,彻底打碎了天球体系,这就使得行星绕日运行成了一个有待解释的问题。开普勒不得不自己创立天界物理学,为行星的绕日规则运动寻求根据。虽然他的天界物理学,只是把亚里士多德式的地面物理学搬到了天界,但已经以某种方式打破了天地二分格局——按照亚里士多德,天界是不存在物理学的。伽利略则通过对自由落体运动和抛物体运动的研究,揭示了它们的数学规律,创立了数学运动学,把某种原先只是在天界行之有效的数学搬到了地界。

伽利略首先示范了自然数学化的可行性,而且明确发表自然数学化运动的宣言:“哲学被写在那部永远在我们眼前打开着的大书上,我指的是宇宙;但只有学会它的书写语言并熟悉了它的书写字符以后,我们才能读它。它是数学语言写成的,字母是三角形、圆以及其他几何图形,没有这些工具,人类连一个词也无法理解。”②

现代早期自然数学化运动的旗手哥白尼、开普勒和伽利略仍然有时代背景的支撑。文艺复兴时期人文主义者对新柏拉图主义的复兴,是其中一个背景。另一个更重要的时代背景是混合数学的大行

① 柯瓦雷:《形而上学与测量》,黄河云译,北京:北京大学出版社 2024 年版,第 123—124 页。

② Galileo, “The Assayer”, in Stillman Drake and C. D. O’Malley, eds., *The Controversy on the Comets of 1618*, University of Pennsylvania Press, 1960, pp.183-184.

其道。

混合数学是介于亚里士多德所谓纯数学(算术与几何) 与自然哲学(物理学) 之间的应用数学学科,比如古典时期的天文学、音乐学(和声学) ,以及光学、透视学、机械学(力学) 、制图学、航海学、弹道学和要塞学等军事工程学。这些混合数学学科随着中世纪手工业和商业贸易的兴起而日益发达,有强烈的应用导向。在这些学科的发展过程中,一方面是定量计算思维,另一方面是使用工具进行精确测量,两方面相辅相成、相得益彰。

自然数学化思想指引下的实验有两大鲜明的特点: 其一,实验以检验或验证理论为目标; 其二,实验可以是借助仪器实际操作的实验,也可以是假想的思想实验。弗兰西斯·培根所主张的实验更多地是定性实验,通过广泛收集事实以归纳出普遍规律。定性实验无须预设数学框架,强调广泛的观察和分类,也不追求理想化场景,主张在复杂的多样化环境中开展实验。培根的定性实验在日后的自然志学科中继续发挥作用,比如达尔文的物种起源研究继承的是培根式实验传统。自然数学化运动中的实验是定量实验,以伽利略为典型,并迅速成为日后实验室科学的典范。

伽利略的实验分为实际操作的探索性实验与理想化的演示性实验两种。柯瓦雷那一代科学史家曾经以为伽利略只做过第二类实验,而限于实验设备的不足和实验条件的复杂,第一类实验根本做不出来。20 世纪 60 年代以来,科学史家研究伽利略的未发表手稿发现,伽利略实际做过大量的探索性实验,尽管自由落体和抛物体的运动数学定律并非从这些探索性实验中归纳总结出来,而是观念革命与思想构思的产物,但他的确做过第一类实验,毕竟他的确是一位动手能力超强的机械制造大师。17 世纪之初他设计制造的军事和民用比例规,使他发了一笔小财。1609 年他只是听说荷兰眼镜商做出了望远镜但还没有见过,便亲自动手设计制作了当时欧洲品质最优良的望远镜。正是望远镜的放大率高、质量好,才使他而不是任何其他人发现了一个全新的天空。

帕斯卡(Blais Pascal, 1623—1662) 是数学化定量实验的大师。他在多姆山的大气压实验和真空实验,既有理论指导和预先的设计,仪器简单但测量准确,有变量控制方案,还确保有可重复性。

波义耳(Robert Boyle, 1627—1691) 是数学化定量实验的另一位大师。他的波义耳定律(恒定温度下气体压强与体积成反比) 实验以及真空实验,采用了胡克精心设计制造的精密复杂的仪器,实验数据准确,确保实验结果可重复,是现代科学实验的经典案例。

六、源头之五: 知识合法性标准的重建

在现代早期的欧洲,知识的合法性标准发生了微妙的改变,直到实验知识被合法化,实验科学才算真正登上了历史的舞台。实验知识合法化包括三个环节: 新知识的合法化、直接经验的合法化、使用仪器的合法化。在追求知识合法化的过程中,对既往权威知识的拒绝、对新知识之公开性和重复性的弘扬扮演了重要角色。

(一) 新知识的合法性

文艺复兴早期,欧洲有教养阶层普遍认为,人类合法知识主要来自圣经和希腊古典著作(特别是亚里士多德的) 这些“权威文本”,不存在“新知识”这样的东西。14 世纪中期葡萄牙水手们来到加那利群岛,他们不会认为自己“发现了”这个群岛,而相信古人早就知道了这个群岛的存在。英国科学史家伍顿(David Wootton, 1952—　) 认为,“发现”这个词及其代表的观念,是现代早期被发明出来的: “与‘发现’的意思最接近的古典拉丁语动词是‘*invenio*’(找出) 、‘*reperio*’(获得) 和‘*exploro*’(探索) ,与它们相对应的名词分别是‘*inventum*’‘*repertum*’‘*exploratum*’。*Invenio* 被哥伦布用来宣告他对新世界的发现; *reperio* 被约翰内斯·施特拉丹乌斯(Johannes Stradanus) 用于他的版画书的书名,那本书用插图阐释了新发现(约 1591) ; *exploro* 被伽利略用来宣布他对木星的卫星的发现(1610) 。在现代译本中,这些词通常都被表示为‘发现’。但是,这遮蔽了一个事实,即在 1492 年,‘发现’并不是

一个已确立的概念。”①如果没有“发现”概念,那么现代早期轰轰烈烈的经验知识大爆炸,就不可能成为合法的新知识的来源。

这种只承认既往权威文本不承认新知识的知识观来自循环时间观。希腊人和文艺复兴之前的欧洲人或多或少都信奉循环时间观②,相信“太阳底下无新鲜事”(《圣经·传道书》1:9),相信一切知识都已经存在于过去(也将存在于未来,因为对循环时间观而言过去即未来),相信时间回溯得越远,就越接近真理。文艺复兴时期,是循环时间观和线性时间观的更替和混合的时期。学者阶层多相信循环时间观,匠人和商人倾向于线性时间观。哥白尼本人把古希腊的菲洛劳斯指为地动说的始祖。伽利略在《关于两大世界体系的对话》里,把日心说的发明者指为古希腊的阿里斯塔克而不是哥白尼。甚至生活在 17 世纪后半叶的牛顿,也似乎相信古人(比如毕达哥拉斯、柏拉图)已经知道所有的知识,包括他自己费很大劲发现的万有引力定律。循环时间观倾向于否定“新知”的合法性。

1492 年美洲的发现是一个标志,标志着并非一切事情都已经被古人所知晓,极大推动了新知识的合法化进程。此前葡萄牙水手已经发现了赤道地区有人类居住,并非希腊学者所说的不适合人类生存。美洲的物产(新植物、新动物)、风土、人情,更是希腊古典学者闻所未闻。到了 1548 年,已经有著作就赤道地区是否宜居的问题做出了这样的回答:“伟大的哲学家们曾就这个问题争论多年,但在我们的时代,经验解决了这个问题。”③

“发现”的概念在 16 世纪被发明出来④,一系列关于“新发现”的著作开始出版传播。17 世纪初在比利时出版的《新发现》一书展示了当时九大发现:美洲、指南针、火药、印刷术、机械钟、愈创木(用于治疗梅毒的美洲树木)、蒸馏器、蚕的家养、马具。⑤ 弗兰西斯·培根在《新工具》(1620)中正式提出“三大发明”的概念:“复次,我们还该注意到发现的力量、效能和后果。这几点是再明显不过地表现在古代所不知、较近才发现、而起源还暧昧不彰的三种发明上,那就是印刷、火药和磁石。这三种发明已经在世界范围内把事物的全部面貌和情况都改变了。”⑥人们开始相信,我们的确可以拥有“新知识”。

在唯名论运动的鼓励下,亚里士多德哲学受到来自四面八方的批评,这相当程度上动摇了希腊古典作家的“权威”地位,从而也使新知识的合法性得到加强。

(二)直接经验的合法性

文艺复兴早期,直接经验即通过感官观察所获得的知识得不到承认,合法性知识通常来自推理而不是直接的感官经验。根本原因仍然是,柏拉图和亚里士多德哲学均认为感官易受欺骗,只能把握表面现象和个别事物,无法获得普遍的确定性的知识。亚里士多德虽然对经验比较友好,认为可以作为知识的起步准备,但他的经验仍然不是直接的感官经验,而是间接经验、他人的经验。

人文主义强调人的感知能力,认为感官经验是人类理解世界的重要途径,为直接经验赋予初步的合法性。唯名论运动鼓励关注具体个别的事物,为感官经验提供了神学的合法性。技术和工艺的实际进步,比如达芬奇通过解剖和观察积累知识,维萨留斯通过实际解剖发现盖伦的错误,展示了感官经验的可靠性。

通过强调经验的集体性、公共性、公开性和可重复性,直接经验的合法性最终得到了强力辩护。培

---

① 伍顿:《科学的诞生》,刘国伟译,北京:中信出版社 2018 年版,第 66 页。

② 吴国盛:《时间的观念》,北京:商务印书馆 2019 年版,第 114—115 页。

③ 伍顿:《科学的诞生》,第 82 页。

④ 伍顿认为,“名词‘discovery’(发现)首次以其新含义在英语中出现是在 1554 年,其动词形式‘discover’的出现是在 1553 年”。见《科学的诞生》第 92 页。

⑤ 帕克、达斯顿主编:《剑桥科学史》第 3 卷,吴国盛主译,郑州:大象出版社 2020 年版,第 1 页。

⑥ 培根:《新工具》,许宝骙译,北京:商务印书馆 1984 年版,第 103 页。

根认为,知识的进步不能依赖个人的孤立观察或天才的灵感,而应通过众多研究者的协作,系统地积累和验证经验数据。个体观察容易受限于感官的缺陷、偏见和偶然性,而多人的协作可能超越个体的局限。他还指出,公开性可使经验被他人检验,避免主观臆断。科学家应该详尽记录实验条件、实验过程,以便他人复现,这种透明性可以使主观感知转化为客观事实。胡克作为皇家学会的实验总监,在学会的每周会议上公开演示实验,并且写作实验报告,详细记录实验装置和实验过程,确保读者能够理解。波义耳强调"目击证人"的重要性,总是邀请同行见证重要的实验过程,通过集体目击消除怀疑,建立确定的事实。

印刷术使个人经验转变为公共经验。在手稿时代,经验总是间接的、含混的、无法追溯到直接经验,而印刷术创造了直接的、明确的、可追溯的、可重复的经验文化。印刷术也创造了无数不在场的目击者(读者),使任何实验始终被置于怀疑的眼光的监视之下。"白纸黑字"使高谈阔论的权威们会自动谨慎著述。印刷术帮助实现了直接经验的合法化。维萨留斯一方面在解剖剧场里当众解剖,一方面出版带有精美插图的著作,生动地演示了知识的公共性带来合法性。作为反例,炼金术在 18 世纪初彻底声名狼藉,就是因为它作为一种秘密的学问,无法获得这种因公开性而带来的合法性。

(三) 使用仪器的合法性

使用仪器的合法性质疑首先来自亚里士多德哲学在自然与人工之间设置的鸿沟,仪器被认为扭曲和干扰了自然的进程。这方面的质疑随着亚里士多德理论的整体式微,自然与人工鸿沟的逐渐填平,手工劳动者地位的整体上升,而得以弱化。

与消除感官经验合法性的质疑一样,诉诸公开性也是为仪器合法性辩护的主要办法。伽利略面对大学教授们对望远镜的质疑,采用的办法是制造许多望远镜送给当时的达官贵人和同行(如开普勒),请他们共同验证他利用望远镜所发现的天空景象是否真实。

胡克出版的《显微图》(1665) 是利用印刷术将显微镜观察经验合法化的典型案例。望远镜展现的天空景象与传统的天界理论不一致,但天界毕竟是存在的。显微镜揭示的却是一个从前完全未知的世界。眼镜用来矫正视力,这似乎无可厚非,但显微镜却让人看到了即使视力正常的人也看不见的东西,这在基督教神学上遭遇困难。在基督教看来,人类既然是上帝按照自己的样子造的,感官就不应该存在原则性的缺陷,如果说居然有一个世界是我们只有借助显微镜才能看到,那是对上帝能力的质疑。不仅如此,显微镜使用者们之间也容易产生不信任。列文虎克用独家自制的高倍显微镜看到的东西,用胡克的显微镜却看不到。解决的办法仍然是诉诸公共性。胡克在皇家学会每周演示显微镜,列文虎克则持续不断向皇家学会寄送自己的观测记录。随着仪器制造水平的提高,对仪器的合法性质疑逐步消散。

结 语

持续千年的炼金术传统在文艺复兴时期进一步兴盛,瓦解了亚里士多德物理学在自然与人工之间设置的不可逾越的界限。唯名论运动以及之后的人文主义运动,塑造了"主动创造""自我创造"的人类主体意志。中世纪技术革命对欧洲经济发展的推动,提高了工匠艺人的社会地位和机械七艺的知识论地位,仪器制造水平大大提高。源自柏拉图主义复兴的自然数学化运动,创造了精确测量和定量实验的内在要求。亚里士多德主义的式微和美洲的发现,使新的知识获得了合法性。印刷术的发明推动了知识的公开性和公共性,科学共同体的社会运作为直接经验知识和仪器的使用赋予了合法性。到 17 世纪,实验科学所要求的主动干预、使用仪器、定量测量和可重复标准诸多要素均已经齐备,实验科学遂成为现代早期重要的科学类型。正是在 17 世纪早期,拉丁语单词 experientia 与 experimentum 在含义上开始出现差异。1660 年开始,experimental philosophy 被广泛使用。1675 年出现 experimental method 词组。

实验科学并不是铁板一块。粗略说来,有培根的定性实验和伽利略的定量实验两大传统。培根传

统影响了自然志(natural history) ,伽利略传统则影响了数理科学(mathematical sciences) 。达尔文的《物种起源》延续了培根传统,爱因斯坦的相对论延续了伽利略传统。在牛顿和拉瓦锡那里,两大传统两度整合,分别产生了牛顿物理学和拉瓦锡化学。

On the Origins of Experimental Science

Wu Guosheng

(*Department of the History of Science*, *Tsinghua University*, *Beijing* 100084, *China*)

Abstract: Greek science was fundamentally non-experimental in nature. Its strict dichotomy between the natural world and human artifice rendered experimentation both impossible and unnecessary. This barrier was first overcome by alchemy, which deliberately blurred the distinction between natural processes and human manipulation, thereby establishing itself as one of the foundational sources of experimental science. A second critical source emerged from the technological revolution of the Middle Ages, which elevated the social standing of manual labor and craftsmen. The practical knowledge gained through technical arts gradually evolved into the methodological framework of experimental science. The late-medieval Nominalist Movement marked a third source by challenging the Aristotelian ideals of classical science, shifting focus from abstract essences to observable phenomena and thereby accelerating the development of experimental approaches. A fourth source arose from the growing trend towards the mathematization of nature, which inherently demanded empirical verification through controlled experimentation. Finally, the invention of printing served as a fifth source by fostering open communication of knowledge and establishing new standards for validating scientific claims through public scrutiny and reproducibility.

Key words: experimental science; early-modern history of science; Renaissance

(责任编辑　刘曙光)